

REC'D 13 JAN 2005

WIPO

PCT

PA 1257069

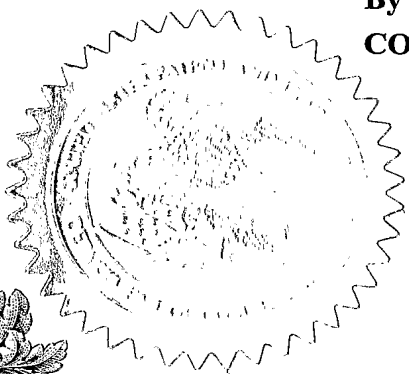
**THE UNITED STATES OF AMERICA****TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME:****UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE****United States Patent and Trademark Office****December 08, 2004**

**THIS IS TO CERTIFY THAT ANNEXED HERETO IS A TRUE COPY FROM  
THE RECORDS OF THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK  
OFFICE OF THOSE PAPERS OF THE BELOW IDENTIFIED PATENT  
APPLICATION THAT MET THE REQUIREMENTS TO BE GRANTED A  
FILING DATE UNDER 35 USC 111.**

**APPLICATION NUMBER: 60/544,967****FILING DATE: February 13, 2004**

**PRIORITY  
DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

**By Authority of the  
COMMISSIONER OF PATENTS AND TRADEMARKS**



**P. R. GRANT**  
**Certifying Officer**

Under the Paperwork Reduction Act of 1995, no persons are required to respond to a collection of information unless it displays a valid OMB control number.

## PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT COVER SHEET

This is a request for filing a PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT under 37 CFR 1.53 (c).

Express Mail Label No. EV 328228082 US

| INVENTOR(S)  |  |  |  |   |  |
|--|--|--|--|---|--|
| Given Name (first and middle (if any))   |  | Family Name or Surname   |  | Residence<br>(City and either State or Foreign Country) |  |
|  |  |  |  |   |  |
| Additional inventors are being named on the _____ separately numbered sheets attached hereto   |  |  |  |   |  |
| TITLE OF THE INVENTION (500 characters max)  |  |  |  |   |  |
| PROJEKTIONSOBJEKTIV FUR EINE MIKROLITHOGRAPHISCHE PROJEKTIONSBELICHTUNGSANLANGE  |  |  |  |   |  |
| Direct all correspondence to: CORRESPONDENCE ADDRESS   |  |  |  |   |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Customer Number:   |  | 22876  |  |   |  |
| OR   |  |  |  |   |  |
| <input type="checkbox"/> Firm or Individual Name   |  |  |  |   |  |
| Address  |  |  |  |   |  |
| Address  |  |  |  |   |  |
| City   |  | State  |  | Zip   |  |
| Country  |  | Telephone  |  | Fax   |  |
| ENCLOSED APPLICATION PARTS (check all that apply)  |  |  |  |   |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Specification Number of Pages 26   |  | <input type="checkbox"/> CD(s), Number _____   |  |   |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Drawing(s) Number of Sheets 4  |  | <input checked="" type="checkbox"/> Other (specify) Return Postcard and Certificate of Mailing by Express Mail |  |   |  |
| <input type="checkbox"/> Application Data Sheet. See 37 CFR 1.76   |  |  |  |   |  |
| METHOD OF PAYMENT OF FILING FEES FOR THIS PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT   |  |  |  |   |  |
| <input type="checkbox"/> Applicant claims small entity status. See 37 CFR 1.27.  |  |  |  | FILING FEE Amount (\$)                                  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> A check or money order is enclosed to cover the filing fees.   |  |  |  | 160.00  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> The Director is hereby authorized to charge filing fees or credit any overpayment to Deposit Account Number: 50-0545 |  |  |  |   |  |
| <input type="checkbox"/> Payment by credit card. Form PTO-2038 is attached.  |  |  |  |   |  |
| The invention was made by an agency of the United States Government or under a contract with an agency of the United States Government                   |  |  |  |   |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> No.  |  |  |  |   |  |
| <input type="checkbox"/> Yes, the name of the U.S. Government agency and the Government contract number are: _____                                       |  |  |  |   |  |

Respectfully submitted,

SIGNATURE

TYPED or PRINTED NAME Jody L. Factor

TELEPHONE (312) 228-1818

[Page 1 of 1]

Date

REGISTRATION NO. 34157

(if appropriate)

Docket Number: OST-041091PV

## USE ONLY FOR FILING A PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT

This collection of information is required by 37 CFR 1.51. The information is required to obtain or retain a benefit by the public which is to file (and by the PTO to process) an application. Confidentiality is governed by 35 U.S.C. 122 and 37 CFR 1.14. This collection is estimated to take 8 hours to complete, including gathering, preparing, and submitting the complete application form to the USPTO. Time will vary depending upon the individual case. Any comments on the amount of time you require to complete this form and/or suggestions for reducing this burden, should be sent to the Chief Information Officer, U.S. Patent and Trademark Office, U.S. Department of Commerce, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450. DO NOT SEND FEES OR COMPLETED FORMS TO THIS ADDRESS. SEND TO: Mail Stop Provisional Application, Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450.

If you need assistance in completing the form, call 1-800-PTO-9199 and select option 2.

In Re Apln. of:

CARL ZEISS SMT AG

Ser. No.:

TO BE ASSIGNED

Filed on:

February 13, 2004

For:

PROJEKTIONSOBJEKTIV FUR EINE  
MIKROLITHOGRAPHISCHE  
PROJEKTIONSBELEUCHTUNGSANLAGE

Docket No.:

OST-041091PV

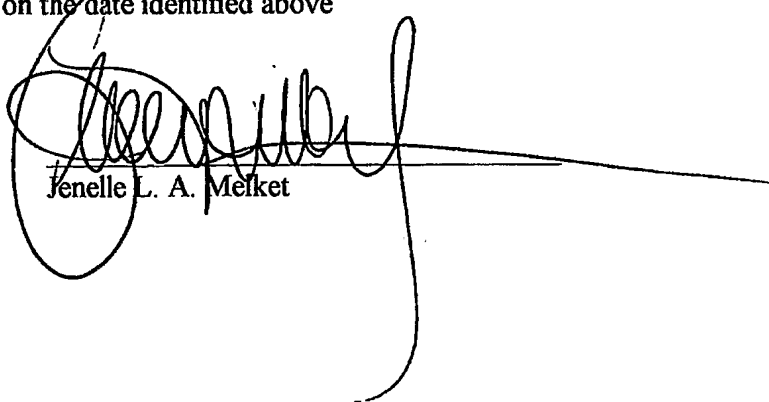
CERTIFICATE OF MAILING BY "EXPRESS MAIL"

Express Mail Mailing Label No.

EV328228082US)

Date of Deposit – February 13, 2004

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the United States Postal Service, "Express Mail Post Office to Addressee" service under 37 C.F.R. 1.10 in an envelope addressed to MAIL STOP PROVISIONAL PATENT APPLICATION, Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA, 22313-1450, on the date identified above



Jenelle L. A. Melket

Projektionsobjektiv für eine  
mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage

=====

Die Erfindung betrifft ein Projektionsobjektiv für mikro-  
lithographische Projektionsbelichtungsanlagen, wie sie  
zur Herstellung hochintegrierter elektrischer Schaltkrei-  
se und anderer mikrostrukturierter Bauelemente verwendet  
5 werden. Die Erfindung betrifft insbesondere ein Projektionsobjektiv, das für einen Immersionsbetrieb ausgelegt ist.

Integrierte elektrische Schaltkreise und andere mikro-  
strukturierte Bauelemente werden üblicherweise herge-  
10 stellt, indem auf ein geeignetes Substrat, bei dem es sich beispielsweise um einen Silizium-Wafer handeln kann, mehrere strukturierte Schichten aufgebracht werden. Zur Strukturierung der Schichten werden diese zunächst mit einem Photolack bedeckt, der für Licht eines bestimmten  
15 Wellenlängenbereiches empfindlich ist. Anschließend wird der so beschichtete Wafer in einer Projektionsbelichtungsanlage belichtet. Dabei wird ein Muster aus Strukturen, das sich auf einer Maske befindet, auf den Photolack mit Hilfe eines Projektionsobjektivs abgebildet. Da der  
20 Abbildungsmaßstab dabei im allgemeinen kleiner als 1 ist, werden derartige Projektionsobjektive häufig auch als Reduktionsobjektive bezeichnet.

Nach dem Entwickeln des Photolacks wird der Wafer einem Ätz- oder Abscheideprozeß unterzogen, wodurch die oberste Schicht entsprechend dem Muster auf der Maske strukturiert wird. Der noch verbliebene Photolack wird dann von  
5 den verbleibenden Teilen der Schicht entfernt. Dieser Prozeß wird so oft wiederholt, bis alle Schichten auf dem Wafer aufgebracht sind.

Eines der wesentlichen Ziele bei der Entwicklung der bei der Herstellung eingesetzten Projektionsbelichtungsanlagen besteht darin, Strukturen mit zunehmend kleineren Abmessungen auf dem Wafer lithographisch definieren zu können. Kleine Strukturen führen zu hohen Integrationsdichten, was sich im allgemeinen günstig auf die Leistungsfähigkeit der mit Hilfe derartiger Anlagen hergestellten  
15 mikrostrukturierten Bauelemente auswirkt.

Die Größe der definierbaren Strukturen hängt vor allem von dem Auflösungsvermögen des verwendeten Projektionsobjektivs ab. Da das Auflösungsvermögen der Projektionsobjektive sich mit kürzer werdenden Wellenlängen des Projektionslichts verbessert, besteht ein Ansatz zur Erhöhung des Auflösungsvermögens darin, Projektionslicht mit  
20 immer kürzeren Wellenlängen einzusetzen. Die kürzesten zur Zeit verwendeten Wellenlängen liegen im tiefen ultravioletten Spektralbereich (DUV, *deep ultraviolet*) und  
25 betragen 193 nm und 157 nm.

Ein anderer Ansatz zur Erhöhung des Auflösungsvermögens geht von der Überlegung aus, in den Zwischenraum, der zwischen einer bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs und dem Photolack oder einer anderen zu belichtenden lichtempfindlichen Schicht verbleibt, eine Immersionsflüssigkeit mit hoher Brechzahl einzubringen. Projektionsobjektive, die für den Immersionsbetrieb ausgelegt sind und deswegen auch als Immersionsobjektive bezeichnet werden, können numerische Aperturen von mehr als 1, z.B. 1.3 oder 1.4, erreichen. Die Immersion ermöglicht jedoch nicht nur hohe numerische Aperturen und dadurch ein vergrößertes Auflösungsvermögen, sondern wirkt sich auch günstig auf die Schärfentiefe aus. Je größer die Schärfentiefe ist, desto weniger hoch sind die Anforderungen an eine exakte Positionierung des Wafers in der Bildebene des Projektionsobjektivs.

Das bildseitig letzte optische Element solcher Immersionsobjektive ist objektseitig meist stark konvex gekrümmt und bildseitig plan, um die möglichen Strahleinfallswinkel kleiner als  $90^\circ$  zu halten und damit eine unerwünschte Totalreflexion zu unterbinden.

Inzwischen sind Immersionsflüssigkeiten entwickelt worden, deren Brechzahl deutlich über derjenigen von deionisiertem Wasser ( $n_{H_2O} = 1,43$ ) liegt und die dennoch auch für Projektionslicht der Wellenlänge 193 nm hochtransparent und beständig sind. Bei der Verwendung von Immersionsflüssigkeiten mit derart hohen Brechzahlen kann der

- Fall auftreten, daß die Brechzahl der Immersionsflüssigkeit größer ist als die Brechzahl des Materials, aus dem das bildseitig letzte optische Element besteht. Die numerische Apertur kann dann nicht höher sein als die Brech-
- 5 zahl des Materials, aus dem das bildseitig letzte optische Element besteht. Handelt es sich dabei z.B. um Quarzglas, so ist eine Steigerung der numerischen Apertur über die Brechzahl von Quarzglas hinaus ( $n_{\text{SiO}_2} = 1,56$ ) nicht möglich.
- 10 Aus der JP 2000-058436 A ist eine Projektionsbelichtungsanlage bekannt, bei der sich in den Zwischenraum zwischen einem als Trockenobjektiv ausgelegten Projektionsobjektiv und einer lichtempfindlichen Schicht eine Zusatzlinse einführen läßt, die bildseitig konkav gekrümmt ist. Zwi-
- 15 schen die Zwischenlinse und der lichtempfindlichen Schicht kann eine Immersionsflüssigkeit, z.B. ein Öl, eingebracht werden. Über die Brechzahlen der Immersionsflüssigkeit und des Materials, aus dem die Zwischenlinse besteht, ist dort nichts offenbart.
- 20 Aufgabe der Erfindung ist es, ein für den Immersionsbetrieb ausgelegtes Projektionsobjektiv anzugeben, bei dem die Brechzahl der Immersionsflüssigkeit größer ist als die Brechzahl eines bildseitig letzten optischen Ele-
- 
- 25 Brechzahl beschränkt ist.

Gelöst wird diese Aufgabe durch ein Projektionsobjektiv, das zur Abbildung einer in einer Objektebene des Projektionsobjektivs anordenbaren Maske auf eine in einer Bildebene des Projektionsobjektivs anordenbare lichtempfindliche Schicht vorgesehen ist. Das Projektionsobjektiv ist für einen Immersionsbetrieb ausgelegt, bei dem eine Immersionsflüssigkeit an die lichtempfindliche Schicht angrenzt, deren Brechzahl größer ist als die Brechzahl eines bildseitig letzten optischen Elements des Projektionsobjektivs. Erfindungsgemäß ist das Projektionsobjektiv so ausgelegt, daß die Immersionsflüssigkeit im Immersionsbetrieb zur Objektebene hin konvex gekrümmt ist.

Durch die konvexe Krümmung der Immersionsflüssigkeit zur Objektebene hin werden die möglichen Strahleinfallswinkel vergrößert, unter denen Projektionslicht auf die Grenzfläche zwischen dem bildseitig letzten optischen Element und der Immersionsflüssigkeit auftreffen, ohne daß es dabei zur hohen Reflexionsverlusten kommt. Dies wiederum erlaubt eine höhere numerische Apertur, die nun auch über der Brechzahl des Materials liegen kann, aus dem das bildseitig letzte optische Element besteht. Begrenzt wird die numerische Apertur auf diese Weise nur noch durch die Brechzahl der Immersionsflüssigkeit, die an die lichtempfindliche Schicht angrenzt, nicht aber durch die Brechzahl des Materials, aus dem das bildseitig letzte optische Element besteht.



- Die einfachste Möglichkeit, eine zur Objektebene hin konvex gekrümmte Immersionsflüssigkeit zu erzielen, besteht darin, die Immersionsflüssigkeit im Immersionsbetrieb unmittelbar an eine konkav gekrümmte bildseitige Fläche des
- 5 bildseitig letzten optischen Elements angrenzen zu lassen. Die Krümmung der Immersionsflüssigkeit ist dann unveränderbar durch die Krümmung der bildseitig letzten Fläche des bildseitig letzten optischen Elements festgelegt.
- 10 Um ein unerwünschtes Abfließen der Immersionsflüssigkeit aus dem Hohlraum zu verhindern, der durch die konkav gekrümmte bildseitige Fläche des bildseitig letzten optischen Elements gebildet wird, kann diese Fläche umfangs-
- 15 es sich beispielsweise um einen Ring handeln, der mit dem bildseitig letzten optischen Element verbunden ist. Der Ring, der z.B. aus einem üblichen Linsenmaterial wie Quarzglas oder Kalziumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ), aber auch aus einer Keramik oder aus vergütetem Stahl bestehen kann, ist vor-
- 20 zugsweise innen mit einer Beschichtung versehen, die eine Kontamination der Immersionsflüssigkeit durch den Ring verhindert.

- 
- Besonders klein sind bei die Strahleinfallswinkel an der Grenzfläche zwischen dem bildseitig letzten optischen
- 25 Element und der Immersionsflüssigkeit, wenn die bildseitige Fläche des bildseitig letzten optischen Elements zumindest im wesentlichen kugelschalenförmig ist.

Berechnungen haben ferner gezeigt, daß der Krümmungsradius der bildseitigen Fläche des bildseitig letzten optischen Elements dabei vorzugsweise zwischen dem 0,9fachen und dem 1,5fachen und vorzugsweise das 1,3fache des axialen Abstandes zwischen der bildseitigen Fläche des bildseitig letzten optischen Elements und der Bildebene beträgt.

Eine andere Möglichkeit, eine zur Objektebene hin konvex gekrümmte Grenzfläche der Immersionsflüssigkeit zu erhalten, besteht darin, im Immersionsbetrieb zwischen dem bildseitig letzten optischen Element des Projektionsobjektivs und der Immersionsflüssigkeit eine nicht mit der Immersionsflüssigkeit mischbare Zwischenflüssigkeit einzubringen, die in einem elektrischen Feld zu der Immersionsflüssigkeit eine gekrümmte Grenzfläche ausbildet.

Diese Ausgestaltung der Erfindung macht von einem Effekt Gebrauch, der auch als "Electrowetting" bekannt ist. Wird das elektrische Feld in seiner Größe verändert, so geht damit eine Veränderung der Krümmung der Grenzfläche einher. Eingesetzt wird dieser Effekt bislang allerdings nur für Autofokus-Linsen für CCD- oder CMOS-Sensoren in Bauteilen, die von der Firma Varioptic, Frankreich, hergestellt werden.

Je mehr sich die elektrische Leitfähigkeit der beiden Flüssigkeiten voneinander unterscheidet, desto größer ist die Krümmung der Grenzfläche. Im allgemeinen wird es des-

wegen bevorzugt sein, daß eine der beiden Flüssigkeiten, und zwar insbesondere die Zwischenflüssigkeit, elektrisch leitfähig und die andere Flüssigkeit, vorzugsweise die Immersionsflüssigkeit, elektrisch isolierend ist.

- 5   Günstig ist es ferner, wenn die Zwischenflüssigkeit im wesentlichen die gleiche Dichte wie die Immersionsflüssigkeit hat, da dann keine Auftriebskräfte entstehen können und somit die Form der Grenzfläche unabhängig von der Lage der Anordnung im Raum ist.
- 10   Die Brechzahl der Zwischenflüssigkeit sollte geringer sein als die Brechzahl der Immersionsflüssigkeit, kann aber bezüglich der Brechzahl des Materials, aus dem das bildseitig letzte optische Element besteht, kleiner oder auch größer als diese sein.
- 15   Vorzugsweise wird das elektrische Feld, das zur Ausbildung der gekrümmten Grenzfläche erforderlich ist, durch eine Elektrode erzeugt. Eine symmetrische Ausbildung der Grenzfläche läßt sich z.B. mit einer ringförmigen Kegel-  
elektrode erzielen, die zwischen dem bildseitig letzten  
20   optischen Element und der Bildebene angeordnet ist. Durch Verändern einer an die Elektrode angelegten Spannung kann  
auf diese Weise die Krümmung der Grenzfläche kontinuierlich verändert werden. Dies läßt sich ausnutzen, um bestimmte Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs  
25   zu korrigieren.

Auch bei der Ausgestaltung der Erfindung mit einer Zwischenflüssigkeit ist es bevorzugt, wenn die Grenzfläche der Zwischenflüssigkeit und der Immersionsflüssigkeit zumindest näherungsweise kugelschalenförmig ist.

- 5 Die erfindungsgemäß möglichen sehr hohen numerischen Aperturen, die beispielsweise 1,6 und darüber betragen können, erfordern u.U. eine neuartige Konzeption des Projektionsobjektivs. Bevorzugt ist dabei ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit mindestens zwei Abbildungs-  
10 spiegeln, in dem mindestens zwei Zwischenbilder entstehen.

Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnung. Darin zeigen:

- 15 Figur 1 einen Meridionalschnitt durch eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage mit einem erfindungsgemäßen Projektionsobjektiv in einer stark vereinfachten, nicht maßstäblichen Darstellung;
- 
- 20 Figur 2 eine vergrößerte Darstellung des bildseitigen Endes des in der Figur 1 gezeigten Projektionsobjektivs;

Figur 3 eine der Figur 2 entsprechende Darstellung, bei der das Projektionsobjektiv jedoch zusätzlich mit einer Ablaufsperre versehen ist;

5      Figur 4 das bildseitige Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem anderen Ausführungsbeispiel, bei dem zwischen der Immersionsflüssigkeit und dem bildseitig letzten optischen Element eine Zwischenflüssigkeit eingebracht ist;

10      Figur 5 einen Meridionalschnitt durch ein vollständiges katadioptrisches Projektionsobjektiv gemäß der vorliegenden Erfindung.

Die Figur 1 zeigt einen Meridionalschnitt durch eine insgesamt mit 110 bezeichnete mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage in stark vereinfachter, nicht maßstäblicher Darstellung. Die Projektionsbelichtungsanlage 15 110 weist eine Beleuchtungseinrichtung 112 zur Erzeugung von Projektionslicht 113 auf, die eine Lichtquelle 114, eine mit 116 angedeutete Beleuchtungsoptik und eine Blende 118 umfaßt. Das Projektionslicht 113 hat in dem dargestellten Ausführungsbeispiel eine Wellenlänge von 193 nm. 20

---

Zur Projektionsbelichtungsanlage 110 gehört ferner ein Projektionsobjektiv 120, das eine Vielzahl von Linsen enthält, von denen der Übersichtlichkeit halber in der Figur 1 lediglich einige beispielhaft angedeutet und mit 25 L1 bis L5 bezeichnet sind. Das Projektionsobjektiv 120

dient dazu, eine in einer Objektebene 122 des Projektionsobjektivs 120 angeordnete Maske 124 verkleinert auf eine lichtempfindliche Schicht 126 abzubilden. Die Schicht 126, die z.B. aus einem Photolack bestehen kann,  
5 ist in einer Bildebene 128 des Projektionsobjektivs 120 angeordnet und auf einem Träger 130 aufgebracht.

In einen Zwischenraum 132, der zwischen der bildseitig letzten Linse L5 und der lichtempfindlichen Schicht 126 verbleibt, ist eine Immersionsflüssigkeit 134 einge-  
10 bracht.

Besonders gut ist dies in der Figur 2 erkennbar, in der das bildseitige Ende des Projektionsobjektivs 120 vergrößert dargestellt ist. Die bildseitig letzte Linse L5 weist bildseitig eine Fläche 136 auf, die konkav gekrümmt  
15 ist. Der Zwischenraum 132 zwischen der bildseitig letzten Linse L5 und der lichtempfindlichen Schicht 126 erhält dadurch die Form eines Hohlraums.

Die Fläche 136 ist annähernd kugelschalenförmig, wobei der Krümmungsradius in der Figur 2 mit R bezeichnet ist.  
20 Der Krümmungsradius R beträgt dabei etwa das 1,3fache des axialen Abstandes d zwischen der bildseitig letzten Linse L5 und der lichtempfindlichen Schicht 126.

---

Die Immersionsflüssigkeit 134 hat eine Brechzahl  $n_L$ , die größer ist als die Brechzahl des Materials  $n_1$ , aus dem  
25 die bildseitig letzte Linse L5 besteht. Wird als Material

- beispielsweise Quarzglas oder Kalziumfluorid verwendet, so ist eine Flüssigkeit zu wählen, deren Brechzahl  $n_L$  über 1,56 bzw. 1,5 liegt. Erreichen läßt sich dies beispielsweise durch Zusätze von Sulfaten, Alkalien wie z.B. Cäsium oder Phosphaten zu Wasser, wie dies auf der Internetseite [www.eetimes.com/semi/news/OEG20040128S0017](http://www.eetimes.com/semi/news/OEG20040128S0017) beschrieben ist. Diese Immersionsflüssigkeiten haben auch bei Wellenlängen im ultravioletten Spektralbereich eine ausreichende Transparenz und Beständigkeit. Ist die Projektionsbelichtungsanlage 110 für längere Wellenlängen ausgelegt, z.B. für Wellenlängen im sichtbarem Spektralbereich, so können auch herkömmliche Immersionsflüssigkeiten mit hoher Brechzahl wie beispielsweise Zedernholzöl, Schwefelkohlenstoff oder Monobromnaphtalin als Immersionsflüssigkeit verwendet werden.

- Da die Immersionsflüssigkeit zur Objektebene 122 hin eine konvex gekrümmte Grenzfläche 139 zur bildseitig letzten Linse L5 hat, treten an dieser Grenzfläche 139 nur relativ kleine Strahleinfallswinkel auf. Dies ist in der Figur 2 beispielhaft für Randstrahlen 113a und 113b gezeigt. Entsprechend gering sind dadurch Reflexionsverluste an dieser Grenzfläche. Dadurch können auch Strahlen mit großen Öffnungswinkeln zu einer optischen Achse 138 des Projektionsobjektivs 120 zur Abbildung beitragen, so daß sich mit dem Projektionsobjektiv 120 numerische Aperturen erzielen lassen, die bis an die Brechzahl  $n_L$  der Immersionsflüssigkeit 134 heranreichen können. Wäre die Grenzfläche 139 hingegen plan, wie dies im Stand der

Technik üblich ist, so wären diese Randstrahlen in der bildseitig letzten Linse L5 nicht ausbreitungsfähig.

In der Figur 3 ist ein Projektionsobjektiv 120' gemäß einem anderen Ausführungsbeispiel in einer an die Figur 2 angelehnten Darstellung gezeigt. Gleiche Teile sind dabei  
5 mit identischen Bezugsziffern gekennzeichnet.

Das Projektionsobjektiv 120' unterscheidet sich von dem in den Figuren 1 und 2 gezeigten Projektionsobjektiv 120 lediglich dadurch, daß die bildseitig letzte Linse L5 zur  
10 lichtempfindlichen Schicht 126 hin dichtend mit einem Ring 140 verbunden ist, der die Funktion einer Abflußsperre für die Immersionsflüssigkeit 134 hat. Eine solche Abflußsperre kann insbesondere bei starken Krümmungen der Fläche 136 der bildseitig letzten Linse L5 erforderlich  
15 sein, da der Zwischenraum 132 dann in Richtung der optischen Achse 138 eine große maximale Ausdehnung hat. Entsprechend hoch ist dementsprechend der hydrostatische Druck der Immersionsflüssigkeit 134. Ohne eine Abflußsperre kann dieser Druck eventuell dazu führen, daß die  
20 Immersionsflüssigkeit 134 aus dem Hohlraum in den umgebenden Spalt zwischen dem Projektionsobjektiv 120 und der lichtempfindlichen Schicht 126 gedrückt wird und auf diese Weise den Hohlraum verläßt.

---

Der Ring 140 kann beispielsweise aus einem üblichen Lin-  
25 senmaterial wie Quarzglas oder Kalziumfluorid, aber auch



aus anderen Materialien wie etwa Invar-Stahl oder einer Keramik bestehen.

Die Figur 4 zeigt ein bildseitiges Ende eines Projektionsobjektivs 120'' gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel, bei dem eine Krümmung der Immersionsflüssigkeit 134 auf andere Weise erreicht wird.

Bei dem Projektionsobjektiv 120'' grenzt die Immersionsflüssigkeit 134 nicht unmittelbar an eine bildseitig letzte Linse L5''. Vielmehr befindet sich zwischen der bildseitig letzten Linse L5'' und der Immersionsflüssigkeit 134 eine weitere Flüssigkeit, die im folgenden als Zwischenflüssigkeit 142 bezeichnet wird. Bei der Zwischenflüssigkeit 142 handelt es sich um mit Ionen versetztes Wasser, wodurch dieses elektrisch leitfähig wird.

Die Immersionsflüssigkeit 134, die auch hier einen größeren Brechungsindex hat als das Material, aus dem die bildseitig letzte Linse L5'' besteht, ist hingegen elektrisch isolierend. Bei Wellenlängen des Projektionslichts, die im sichtbaren Spektralbereich liegen, sind beispielsweise die oben bereits angesprochenen Öle und Naphtaline als Immersionsflüssigkeit 134 geeignet.

---

Die Zwischenflüssigkeit 142 füllt den Raum, der zwischen einer bildseitigen Fläche 136'' der bildseitig letzten Linse L5'' und der Immersionsflüssigkeit 134 verbleibt, vollständig aus. Die Fläche 136'' ist bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel konvex gekrümmt, jedoch kann es

sich dabei auch um eine plane Fläche handeln. An einen Ring 140'', der wie bei dem zuvor geschilderten Ausführungsbeispiel die Funktion einer Ablaufsperre hat, schließt sich bildseitig eine ebenfalls ringförmige Kegelelektrode 146 an, die mit einer regelbaren Spannungsquelle 147 verbunden ist. Auf die Kegelelektrode 146 ist eine Isolatorschicht 148 aufgebracht, die zusammen mit der lichtempfindlichen Schicht 126 eine durchgehende Isolation der Immersionsflüssigkeit 134 zur Bildebene hin gewährt. Die Spannungsquelle 147 erzeugt eine Wechselspannung, deren Frequenz zwischen 100 kHz und 500 kHz liegt. Die an die Kegelelektrode 146 angelegte Spannung liegt in der Größenordnung von etwa 40 V.

Bei Anlegen der Wechselspannung an die Kegelelektrode 146 führt der an sich bekannte Electrowetting-Effekt dazu, daß sich die Grenzfläche 139 zwischen der Immersionsflüssigkeit 134 und der Zwischenflüssigkeit 142 konvex zur Objektebene 122 hin krümmt. Ursache dieser Krümmung sind Kapillarkräfte, die, zusammen mit der Unveränderbarkeit des Gesamtvolumens und der Tendenz zur Ausbildung einer Minimalfläche, in guter Näherung eine kugelschalenförmige Grenzfläche 139 erzeugen, wenn eine ausreichend hohe Wechselspannung an die Kegelelektrode 146 angelegt wird.

Wird die Wechselspannung verringert, so nimmt die Krümmung der Grenzfläche 139 ab. In der Figur 4 ist dies durch eine gestrichelte dargestellte Grenzfläche 139' angedeutet. Die Brechkraft der durch die Immersionsflüssig-

keit 134 gebildeten Flüssiglinse kann somit auf einfache Weise, nämlich durch Verändern der an die Kegelelektrode 146 angelegten elektrischen Wechselspannung, kontinuierlich verändert werden. Der Vollständigkeit halber sei an 5 dieser Stelle noch erwähnt, daß die Krümmung der Grenzfläche 139 nicht unbedingt eine Wechselspannung erfordert, sondern auch mit einer Gleichspannung erzielbar ist.

Auch bei dem in der Figur 4 gezeigten Projektionsobjektiv 10 120'' führt die konvex zur Objektebene 122 hin gekrümmte Grenzfläche der Immersionsflüssigkeit 134 dazu, daß sich eine numerische Apertur erzielen läßt, die nicht durch die Brechzahl des Materials der bildseitig letzten Linse L5'', sondern lediglich durch die Brechzahl der Immersi- 15 onsflüssigkeit 134 begrenzt ist.

Die kontinuierliche Veränderbarkeit der Brechkraft der durch die Immersionsflüssigkeit 134 gebildeten Flüssiglinse kann vorteilhaft auch an anderen Orten des Projektionsobjektivs eingesetzt werden. An die Stelle der 20 lichtempfindlichen Schicht 126, die ein Abfließen der Immersionsflüssigkeit 134 verhindert, kann dann z.B. eine planparallele transparente Platte treten. Bei geeigneter Wahl der Immersionsflüssigkeit 134 läßt sich mit einem solchen Element die chromatische Korrektur des Projekti- 25 onsobjektivs verbessern. Vorteilhaft eingesetzt werden kann eine solche Flüssiglinse auch an solchen Stellen innerhalb des Projektionsobjektivs, die einer besonders ho-

hen Belastung durch das Projektionslicht ausgesetzt sind. Degradationserscheinungen, wie sie bei herkömmlichen stark belasteten optischen Elementen auftreten, können auf diese Weise unterbunden oder zumindest durch Austausch der Immersionsflüssigkeit auf einfache Weise behoben werden. Entsprechendes gilt im übrigen auch für die in den Figuren 2 und 3 gezeigten Ausgestaltungen.

Die Figur 5 zeigt einen Meridionalschnitt durch ein konkretes Ausführungsbeispiel des in den Figuren 1 und 2 gezeigten Projektionsobjektivs 120. Die Designdaten des Projektionsobjektivs sind in der Tabelle 1 aufgeführt; Radien- und Dicken sind in Millimetern angegeben. Die Ziffern oberhalb des Projektionsobjektivs weisen auf ausgewählte Flächen optischer Elemente hin. Flächen, die mit Gruppen kurzer waagerechter Linien gekennzeichnet sind, sind asphärisch gekrümmt. Die Krümmung dieser Flächen ist durch die nachfolgende Asphärenformel gegeben:

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k) c^2 h^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} + Fh^{14} + Gh^{16} + Hh^{18} + Jh^{20}$$

---

Dabei sind  $z$  die Pfeilhöhe der betreffenden Fläche parallel zur optischen Achse,  $h$  der radiale Abstand von der optischen Achse,  $c = 1/R$  die Scheitelkrümmung der betreffenden Fläche mit  $R$  als dem Krümmungsradius,  $k$  die konische Konstante und  $A, B, C, D, E, F, G, H$  und  $J$  die in der Tabelle 2 aufgeführten Asphärenkonstanten. Für die

konische Konstante  $k$  gilt bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel  $k = 0$ .

Das Projektionsobjektiv 120 enthält zwei asphärische Spiegel S1 und S2, zwischen denen zwei (nicht optimal korrigierte) Zwischenbilder entstehen. Das Projektionsobjektiv 120 ist ausgelegt für eine Wellenlänge von 193 nm und eine Brechzahl  $n_L$  der Immersionsflüssigkeit von 1,6. Der Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs 120 beträgt  $\beta = -0,25$  und die numerische Apertur  $NA = 1,4$ .  
10 Durch einige zusätzliche Verbesserungen läßt sich aber ohne weiteres auch eine numerische Apertur  $NA$  erzielen, die knapp bis an die Brechzahl des Immersionsmediums heranreicht und somit nur geringfügig kleiner ist als 1,6.

Es versteht sich, daß die vorliegende Erfindung nicht auf die Verwendung in katadioptrischen Projektionsobjektiven des vorstehend beschriebenen Typs beschränkt ist. Ebenso gut kann die Erfindung auch in Projektionsobjektiven mit gefalteten Strahlengängen und lediglich einem Zwischenbild oder auch in rein refraktiven Objektiven mit oder  
20 ohne Zwischenbild eingesetzt werden. Die optische Achse kann außerdem stets im Bildfeld auch teilweise auch außerhalb davon verlaufen. Beispiele für geeignete Objektivdesigns finden sich u.a. in der US 2002/0196533 A1, der WO 150171 A1, der WO 02/093209 A2 und der US 6496306  
25 A der Anmelderin, deren Offenbarungsgehalt hiermit vollumfänglich mit aufgenommen wird.

Tabelle 1: Designdaten

| Fläche      | Radius    | Asphäre | Dicke   | Material         |
|-------------|-----------|---------|---------|------------------|
| Objektebene | 0         |         | 37,648  |                  |
| 1           | 210,931   |         | 21,995  | SiO <sub>2</sub> |
| 2           | 909,02    |         | 1,605   |                  |
| 3           | 673,572   |         | 22,728  | SiO <sub>2</sub> |
| 4           | -338,735  | x       | 33,19   |                  |
| 5           | 130,215   | x       | 8,994   | SiO <sub>2</sub> |
| 6           | 119,808   |         | 36,001  |                  |
| 7           | 216       |         | 40,356  | SiO <sub>2</sub> |
| 8           | -210,59   |         | 0,939   |                  |
| 9           | 97,24     |         | 49,504  | SiO <sub>2</sub> |
| 10          | 216,208   | x       | 8,164   |                  |
| 12          | -65,704   |         | 49,734  | SiO <sub>2</sub> |
| Blende      | 0         |         | 49,302  |                  |
| 13          | -113,325  |         | 55,26   |                  |
| 14          | -6210,149 | x       | 70,31   | SiO <sub>2</sub> |
| 15          | -195,536  |         | 0,962   |                  |
| 16          | 3980,16   |         | 65,997  | SiO <sub>2</sub> |
| 17          | -473,059  |         | 277,072 |                  |
| 18          | -225,942  | x       | 246,731 | Spiegel          |
| 19          | 193,745   | x       | 294,329 | Spiegel          |
| 20          | -338,56   | x       | 17,389  | SiO <sub>2</sub> |
| 21          | -206,244  |         | 8,884   |                  |
| 22          | -148,97   |         | 34,064  | SiO <sub>2</sub> |
| 23          | 129,921   | x       | 40,529  |                  |
| 24          | -2704,885 |         | 33,192  | SiO <sub>2</sub> |
| 25          | -195,599  |         | 0,946   |                  |
| 26          | -794,214  | x       | 30,169  | SiO <sub>2</sub> |
| 27          | -479,39   |         | 24,236  |                  |
| 28          | -311,778  | x       | 100,056 | SiO <sub>2</sub> |
| 29          | -159,333  |         | 28,806  |                  |
| 30          | 309,839   |         | 43,609  | SiO <sub>2</sub> |
| 31          | 836,077   | x       | 0,951   |                  |
| 32          | -225,096  |         | 55,667  | SiO <sub>2</sub> |
| 33          | 687,556   |         | 0,945   |                  |
| 34          | 154,575   |         | 64,278  | SiO <sub>2</sub> |
| 35          | 911,8     | x       | 0,932   |                  |
| 36          | 89,986    |         | 44,143  | SiO <sub>2</sub> |
| 37          | 199,475   | x       | 0,878   |                  |
| 38          | 61,984    |         | 9,635   | SiO <sub>2</sub> |
| 39          | 35,475    |         | 34,43   | Flüssigkeit      |

Tabelle 2: Asphärenkonstanten

| Fläche 4  |                 | Fläche 5  |                 | Fläche 10 |                 |
|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
| A         | 5,36225288E-08  | A         | 2,53854010E-08  | A         | 4,51137087E-07  |
| B         | -5,17992581E-12 | B         | -1,22713179E-11 | B         | 2,46833840E-11  |
| C         | 8,49599769E-16  | C         | 1,21417341E-15  | C         | 5,78498960E-15  |
| D         | -7,57832730E-20 | D         | -1,92474180E-19 | D         | -4,39101683E-18 |
| E         | 3,59228710E-24  | E         | 2,08240691E-23  | E         | -5,64853356E-22 |
| F         | -9,16722201E-29 | F         | -9,29539601E-28 | F         | 4,95744749E-26  |
| Fläche 14 |                 | Fläche 18 |                 | Fläche 19 |                 |
| A         | -8,48905023E-09 | A         | 1,04673033E-08  | A         | -4,11099367E-09 |
| B         | 1,45061822E-13  | B         | 1,34351117E-13  | B         | -9,91828838E-14 |
| C         | -6,34351367E-18 | C         | 1,03389626E-18  | C         | -7,93614779E-19 |
| D         | 2,84301572E-22  | D         | 5,16847878E-23  | D         | -1,66363846E-22 |
| E         | -8,24902650E-27 | E         | -1,23928686E-27 | E         | 5,56486530E-27  |
| F         | 1,27798308E-31  | F         | 3,09904827E-32  | F         | -1,79683490E-31 |
| Fläche 20 |                 | Fläche 23 |                 | Fläche 26 |                 |
| A         | 1,14749646E-07  | A         | -2,87603531E-08 | A         | -4,35420789E-08 |
| B         | -8,19248307E-12 | B         | -9,68432739E-12 | B         | -6,70429494E-13 |
| C         | 8,78420843E-16  | C         | 6,88099059E-16  | C         | -4,05835225E-17 |
| D         | -1,39638210E-19 | D         | -8,70009838E-20 | D         | -1,10658303E-20 |
| E         | 2,09064504E-23  | E         | 9,59884320E-24  | E         | 4,80978147E-25  |
| F         | -2,15981914E-27 | F         | -5,07639229E-28 | F         | -5,35014389E-29 |
| Fläche 28 |                 | Fläche 31 |                 | Fläche 35 |                 |
| A         | -2,70754285E-08 | A         | 4,38707762E-09  | A         | 1,73743303E-08  |
| B         | -1,36708653E-12 | B         | -3,69893805E-13 | B         | 1,60994523E-12  |
| C         | -2,46085956E-17 | C         | -4,93747026E-18 | C         | -1,71036162E-16 |
| D         | 2,26651081E-21  | D         | 4,05461849E-22  | D         | 1,26964535E-20  |
| E         | -1,20009586E-25 | E         | -7,59674606E-27 | E         | -5,77497378E-25 |
| F         | 9,28622501E-30  | F         | 5,58403314E-32  | F         | 1,55390733E-29  |
|           |                 |           |                 | G         | -1,78430224E-34 |
| Fläche 37 |                 |           |                 |           |                 |
| A         | 1,04975421E-07  |           |                 |           |                 |
| B         | 1,94141448E-11  |           |                 |           |                 |
| C         | -2,31145732E-15 |           |                 |           |                 |
| D         | 4,57201996E-19  |           |                 |           |                 |
| E         | -3,92356845E-23 |           |                 |           |                 |
| F         | 2,35233647E-27  |           |                 |           |                 |

## Patentansprüche

=====

1. Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage (110) zur Abbildung einer in einer Objektebene (122) des Projektionsobjektivs (120; 120'; 120'') anordenbaren Maske (124) auf eine in einer  
5 Bildebene (128) des Projektionsobjektivs anordenbare lichtempfindliche Schicht (126), wobei das Projektionsobjektiv (120; 120'; 120'') für einen Immersionsbetrieb ausgelegt ist, bei dem eine Immersionsflüssigkeit (134) an die lichtempfindliche Schicht (126) angrenzt, deren  
10 Brechzahl größer ist als die Brechzahl eines bildseitig letzten optischen Elements (L5; L5'') des Projektionsobjektivs (120; 120'; 120''),

dadurch gekennzeichnet, daß

15

das Projektionsobjektiv (120; 120'; 120'') so ausgelegt ist, daß die Immersionsflüssigkeit (134) im Immersionsbetrieb zur Objektebene (122) hin konvex gekrümmt ist.

2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Immersionsflüssigkeit (134) im Im-  
20 mersionsbetrieb unmittelbar an eine konkav gekrümmte bildseitige Fläche (136) des bildseitig letzten optischen Elements (L5) angrenzt.



3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die gekrümmte bildseitige Fläche (136) des bildseitig letzten optischen Elements (L5) umfangsseitig von einer Ablaufsperre (140) umgeben ist.
- 5 4. dadurch gekennzeichnet, daß die Ablaufsperre als Ring (140) ausgebildet ist, der mit dem bildseitig letzten optischen Element (L5) verbunden ist.
5. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die bildseitige Fläche (136) des bildseitig letzten optischen Elements (L5) zumindest im wesentlichen kugelschalenförmig ist.
- 10 6. Projektionsobjektiv nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Krümmungsradius (R) der bildseitigen Fläche (136) des bildseitig letzten optischen Elements (L5) zwischen dem 0,9fachen und dem 1,5fachen und vorzugsweise das 1,3fache des axialen Abstandes (d) zwischen der bildseitigen Fläche (136) des bildseitig letzten optischen Elements (L5) und der Bildebene (128) beträgt.
- 20 7. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sich im Immersionsbetrieb zwischen dem bildseitig letzten optischen Element (L5'') des Projektionsobjektivs (120'') und der Immersionsflüssigkeit (134) eine nicht mit der Immersionsflüssigkeit (134) mischbare Zwischenflüssigkeit (142) befindet, die in einem elektri-
- 25

schen Feld zu der Immersionsflüssigkeit (134) eine gekrümmte Grenzfläche (139, 139') ausbildet.

8. Projektionsobjektiv nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwischenflüssigkeit (142) elektrisch leitfähig und die Immersionsflüssigkeit (134) elektrisch isolierend ist.
9. Projektionsobjektiv nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwischenflüssigkeit (142) im wesentlichen die gleiche Dichte wie die Immersionsflüssigkeit (134) hat.
10. Projektionsobjektiv nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Immersionsflüssigkeit (134) ein Öl und die Zwischenflüssigkeit (142) Wasser ist.
11. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 10, gekennzeichnet durch eine Elektrode (146) zur Erzeugung des elektrischen Feldes.
12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrode eine ringförmige Kegelelektrode (146) ist, die zwischen dem bildseitig letzten optischen Element (15'') und der Bildebene (128) angeordnet ist.
13. Projektionsobjektiv nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß sich durch Verändern einer

an die Elektrode (146) angelegten Spannung die Krümmung der Grenzfläche (139, 139') verändern läßt.

14. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 7 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Grenzfläche (139, 139') zwischen der Zwischenflüssigkeit (142) und der Immersionsflüssigkeit (139) zumindest näherungsweise kugelschalenförmig ist.

15. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsobjektiv (120) ein katadioptrisches Objektiv mit mindestens zwei Abbildungsspiegeln (S1, S2) ist, das mindestens zwei Zwischenbilder erzeugt.

16. Mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile, gekennzeichnet durch ein Projektionsobjektiv (120; 120'; 120'') nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

17. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente mit folgenden Schritten:

- 
- 20 a) Bereitstellen eines Trägers (130), auf den zumindest teilweise eine Schicht (126) aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist;

- b) Bereitstellen einer Maske (124), die abzubildende Strukturen enthält;
  - c) Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage mit einem Projektionsobjektiv (120; 120', 120'') nach  
5 einem der Ansprüche 1 bis 15;
  - d) Projizieren wenigstens eines Teils der Maske (124) auf einen Bereich auf der Schicht (126) mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage.
- 10 18. Mikrostrukturiertes Bauelement, das nach einem Verfahren nach Anspruch 17 hergestellt ist.

## Zusammenfassung

=====

Bei einem für einen Immersionsbetrieb ausgelegten Projektionsobjektiv (120; 120', 120'') einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage (110) ist die Brechzahl der Immersionsflüssigkeit (134) größer als die

5 Brechzahl eines bildseitig letzten optischen Elements (L5; L5''). Das Projektionsobjektiv ist so ausgelegt, daß die Immersionsflüssigkeit im Immersionsbetrieb zur Objektebene (122) hin konvex gekrümmt ist. Dies kann z.B. dadurch erreicht werden, daß die Immersionsflüssigkeit

10 unmittelbar an eine konkav gekrümmte bildseitige Fläche (136) des bildseitig letzten optischen Elements (L5) angrenzt. Bei einer alternativen Ausgestaltung befindet sich zwischen dem bildseitig letzten optischen Element (L5'') des Projektionsobjektivs (120'') und der Immersi-

15 onsflüssigkeit (134) eine nicht mit der Immersionsflüssigkeit mischbare Zwischenflüssigkeit (142), die in einem elektrischen Feld zu der Immersionsflüssigkeit (134) infolge des sog. "Electrowetting"-Effekts eine gekrümmte Grenzfläche (139, 139') ausbildet. Infolge der konvexen

20 Krümmung der Immersionsflüssigkeit zur Objektebene hin ist die erzielbare numerische Apertur nur durch die

---

Brechzahl der Immersionsflüssigkeit, nicht aber durch die Brechzahl des bildseitig letzten optischen Elements begrenzt.

(Figur 2)

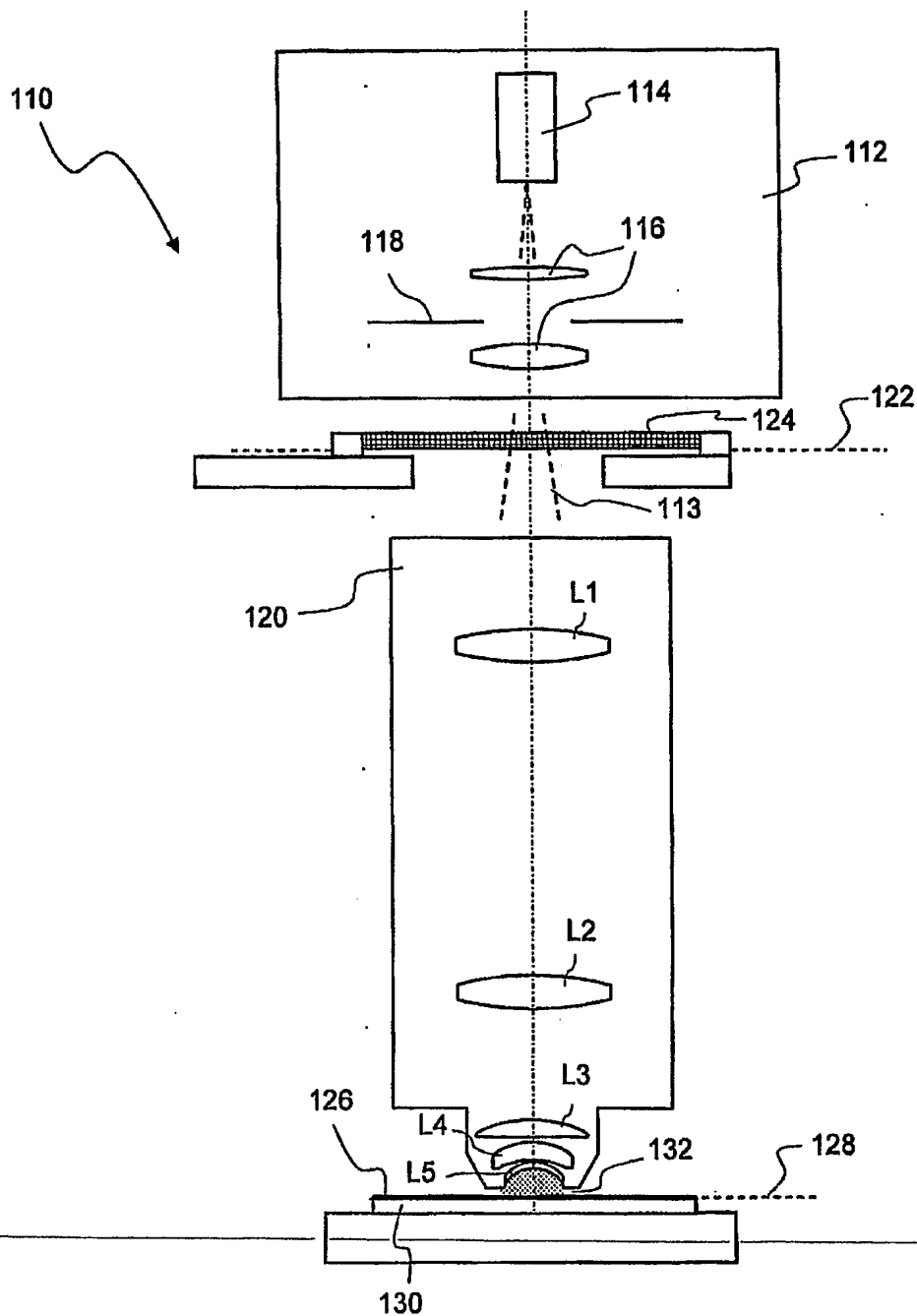


Fig. 1

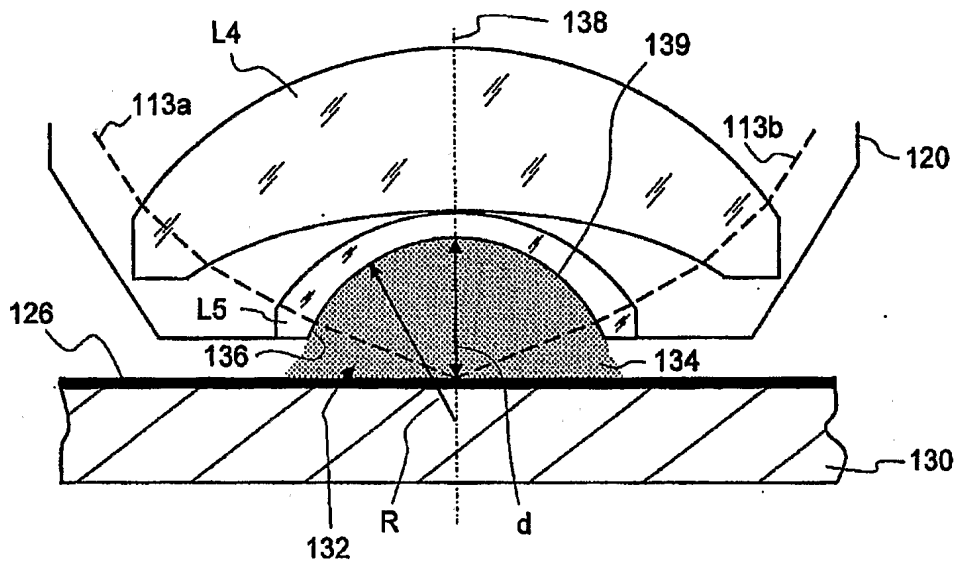


Fig. 2

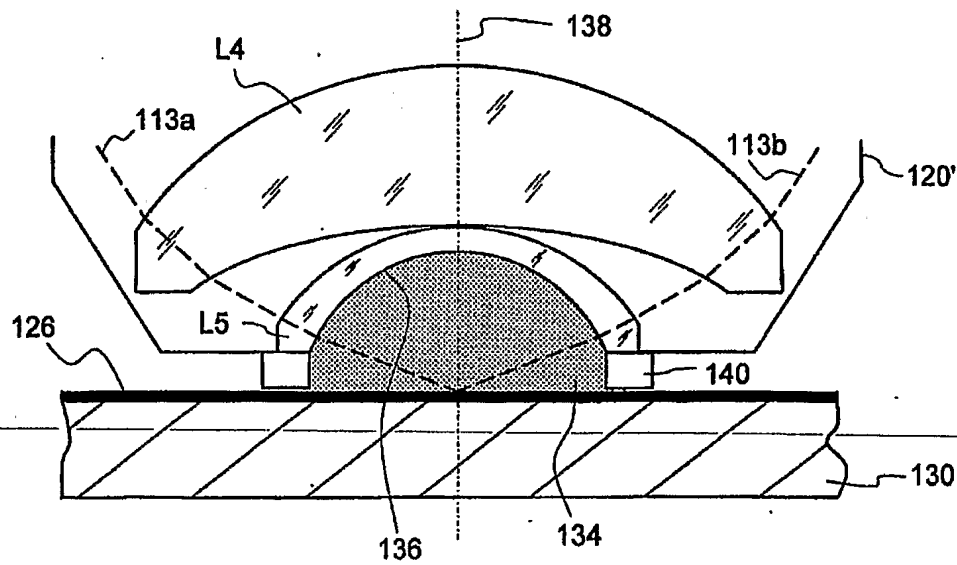


Fig. 3

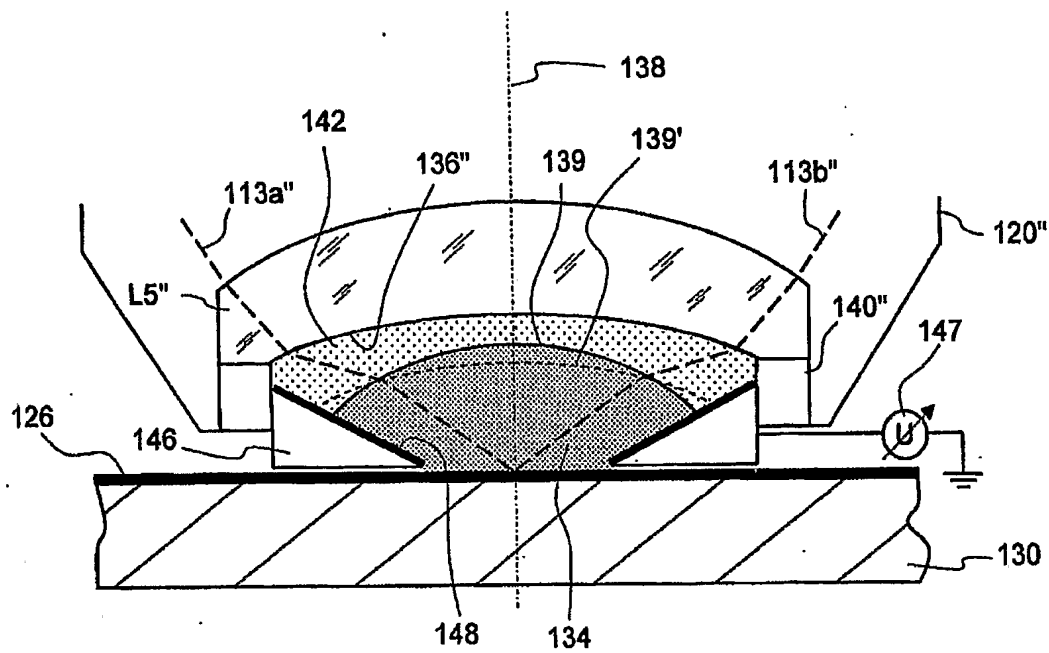


Fig. 4



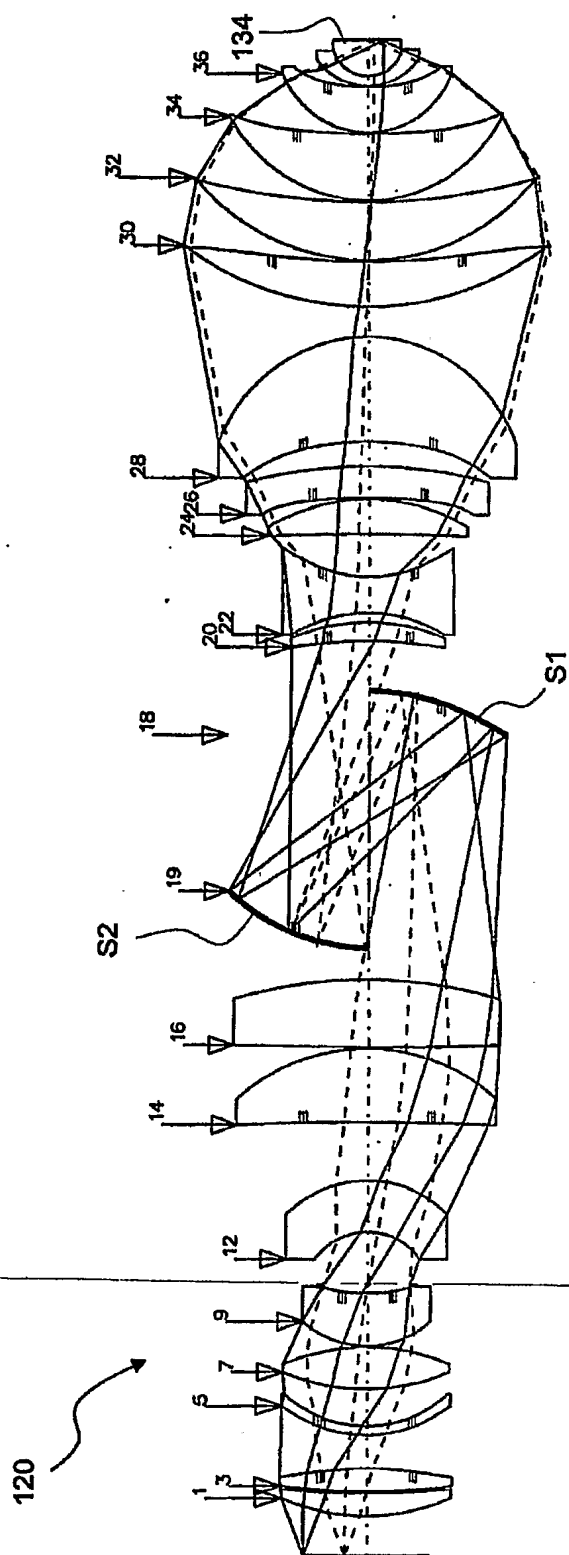


Fig. 5